

## 水源与饮用水保障

王静莹,黄强,周斌,等. 基于谱聚类分区算法的供水管网漏损区域识别技术[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 47-53.

WANG J Y, HUANG Q, ZHOU B, et al. Identification for water supply network leakage area based on spectral clustering partitioning algorithm [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 47-53.

## 基于谱聚类分区算法的供水管网漏损区域识别技术

王静莹<sup>1</sup>,黄 强<sup>2</sup>,周 斌<sup>2</sup>,安淑萍<sup>2</sup>,汪家泉<sup>1</sup>,信昆仑<sup>1,\*</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院,上海 200092;2. 上海市自来水奉贤有限公司,上海 201400)

**摘 要** 【目的】当前供水管网的漏损问题普遍存在且日益突出,如何有效识别漏损发生的位置,降低漏损率是近年供水行业探讨的热点。研究通过虚拟压力分区对供水管网实现区域性漏损识别,以提升检漏工作的针对性,从而实现降低漏损率的目标。【方法】该研究根据供水管网的拓扑情况,利用谱聚类算法对管网进行虚拟分区划分,对同一分区内的用水节点取相同漏损比例系数并作为决策变量,再基于强化精英保留的遗传算法(SEGA),以水力模型中测压点压力计算值与实际值的差值最小化为目标函数,求解水力模型的区域漏损分布情况,并通过实际工程案例验证其可行性。【结果】将技术方法应用于上海市奉贤区南桥镇供水管网,结果显示:完成漏损区域识别的水力模型相较于直接将漏损水量等比例分配的水力模型,其压力监测点模拟值数值更稳定,与实测值更接近,进而推断出该模型中漏损水量分布也更符合实际漏损情况。【结论】漏损区域识别技术可在检漏工作的开展优先顺序方面提供理论参考,指出管网系统中需重点控漏的区域,为最终实现漏点精确定位的硬件检漏工作指明优先区域和方向。

**关键词** 供水管网 谱聚类 漏损识别 水力模型 压力监测点

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)06-0047-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.006

## Identification for Water Supply Network Leakage Area Based on Spectral Clustering Partitioning Algorithm

WANG Jingying<sup>1</sup>, HUANG Qiang<sup>2</sup>, ZHOU Bin<sup>2</sup>, AN Shuping<sup>2</sup>, WANG Jiaquan<sup>1</sup>, XIN Kunlun<sup>1,\*</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Waterworks Fengxian Co., Ltd., Shanghai 201400, China)

**Abstract** [Objective] The current water supply network leakage problem is widespread and increasingly prominent. How to effectively identify the location where leakage occurs and reduce the leakage rate has been a hot topic of discussion in water supply industry in recent years. The study introduces a virtual pressure partitioning approach to enable regional leakage identification in water supply networks, aiming to improve the precision of leakage detection and thereby reduce the overall leakage rate. [Methods] In this study, the spectral clustering algorithm was utilized to divide the pipe network into virtual zones according to the topology of the water supply pipe network. The same leakage ratio coefficient was taken for the water nodes within the same zone, and this coefficient was used as the decision variable. Then, the regional distribution of leakage in the hydraulic model was inferred based on the strengthen elite genetic algorithm (SEGA), with the minimization of the difference between the calculated value of the pressure at pressure points and the actual value in hydraulic model taken as the objective function. The feasibility of the leakage region identification technology

[收稿日期] 2023-12-05

[基金项目] 国家自然科学基金(52270093,51978494)

[作者简介] 王静莹(1999—),女,硕士研究生,研究方向为供水管网设计与运行优化,E-mail:2230511@tongji.edu.cn。

[通信作者] 信昆仑(1977—),男,教授,研究方向为给排水系统设计与运行最优化及城市智慧水务理论技术研发与应用,E-mail: Xkl@tongji.edu.cn。

was verified through actual engineering cases. [Results] When applied to the water supply network in Nanqiao Town, Fengxian District, Shanghai, results indicated that compared to directly allocating leakage volume proportionally in the hydraulic model, the simulated values at pressure monitoring points were more stable and closer to actual values. Furthermore, it was inferred that the distribution of leakage water volume in this model was also more in line with the actual leakage situation. [Conclusion] The leakage area identification technology can provide a theoretical reference in terms of the priority order of leak detection work, point out the areas that need to be focused on for leakage control in the pipeline network system, and indicate the priority areas and directions for the hardware leak detection work that ultimately achieves precise location of leakage points.

**Keywords** water supply pipelines network spectral clustering leakage identification hydraulic model pressure monitoring points

供水管网漏损问题因供水设施的逐渐老化、管理制度的不够完善和城市道路的不断施工等诸多原因,随着时间的推移而日益突出。管网的漏损会带来水资源浪费、供水公司能耗物耗增大、供水管网二次污染及路面塌陷等一系列问题。

国务院在 2015 年印发了《水污染防治行动计划》(以下简称“水十条”),其中明确规定,到 2020 年我国公共供水管网漏损率控制在 10% 以内<sup>[1]</sup>。但从我国 2021 年《城乡建设统计年鉴》的数据来看,2021 年我国城市供水漏损率为 12.68% (包括城市与县城)<sup>[2]</sup>,部分城市管网漏损问题仍较为普遍,城镇管网漏损率居高不下,并未达到“水十条”的明确要求。因此,寻求控制城镇管网漏损的有效技术手段,提升供水效率是目前备受关注的问题。

目前,管网漏损检测中使用的技术大致可分为 2 类,即硬件检测法和软件分析法<sup>[3]</sup>。硬件检测法主要依靠听音杆、相关仪和雷达探测等硬件设备进行人工巡检,可实现漏损精准定位,但由于耗费的人力与时间较多,仅适用于小型区域检漏。随着科学技术的发展,软件分析法也开始用于管网漏损检测。利用数据远传技术及数据采集与监视控制系统 (supervisory control and data acquisition, SCADA) 获取在线监测数据,加以计算机技术及智能算法进行分析,可用于管道的漏损区域识别。在软件分析方面,近年来国内外学者对于漏损识别的相关技术进行了积极探索。董文瑾等<sup>[4]</sup>将双向长短期记忆神经网络 (bidirectional long short-term memory, Bi-LSTM) 应用于分析供水管网漏损节点水压变化规律,实现漏损定位。Steffelbauer 等<sup>[5]</sup>同时探究了包括度量模拟值、监测值差异及搜索解空间等不同因素对差分进化算法识别漏点的影响,并得出同时使用相关性距离度量和 Cuthill-McKee 带宽缩减重排算法时可使上述方法效果最佳的结论。Ribeiro

等<sup>[6]</sup>在管网末梢布置测压点的基础上,利用模拟退火算法优化漏损的空间分布。然而上述研究多数对测压点位置要求较高,且缺乏实际工程案例应用支撑,对于大型供水管网区域漏损识别应用不足,因此还有很大改进空间。

文章主要探讨基于谱聚类分区算法的供水管网漏损区域识别技术。采用谱聚类算法结合水力模型进行虚拟分区划分,对同一分区的节点取同一漏损比例系数,在此基础上使用精英保留的遗传算法 (SEGA) 求解漏损区域分布情况,实现漏损区域识别。通过将其应用于奉贤区南桥镇的实际工程,验证漏损区域识别方法的有效性。

## 1 基于谱聚类的管网虚拟压力分区

### 1.1 虚拟压力分区的作用及原则

本研究利用虚拟压力分区的方法对水力模型中的节点进行分组。区别于独立计量区域 (district metering area, DMA) 的划分,虚拟分区并非将管网真正划定分区,不存在独立计量的功能,而是完成分组后对同一虚拟分区内的节点取相同的决策变量  $x$ 。由于实际压力监测设备的数量要远远小于节点数量,进行虚拟压力分区可起到降维作用,将欠定方程转换为正定或超定方程以便于后续的求解<sup>[7]</sup>。虚拟压力分区的过程中一般以压力相似性为目标,同时顾及节点间距,划分的分区满足局部压力均衡及内部空间拓扑结构连通 2 个条件。此外,在虚拟分区的过程中还需注意分区规模不应相差过大,虚拟分区平均服务面积不应小于  $2 \text{ km}^2$ ,相邻虚拟分区的需水量规模尽量相近,同时,考虑测压点的数目与位置以确定分区数目。

### 1.2 谱聚类的管网虚拟压力分区原理

此研究采用谱聚类算法划分虚拟压力分区。谱聚类算法理论基础为图论中的谱图划分理论,其本质是将谱聚类问题转化为图的最优划分问题<sup>[8]</sup>。

相较于传统聚类算法,谱聚类算法具有不要求样本聚类形状为凸形、对异常数据不敏感以及可以识别非高斯分布数据等优点<sup>[9]</sup>。利用谱聚类进行供水管网分区过程大致可分为2个阶段:旨在定义管网子集形状和维数的聚类阶段;对管网进行物理分区的划分阶段<sup>[10]</sup>。本研究利用谱聚类算法进行虚拟压力分区的步骤大致如下:

- (1) 根据水力模型获取样本集  $V$ ;
- (2) 采用  $K$  邻近法构造邻接矩阵  $W$ , 构造度矩阵  $D$ ;
- (3) 计算拉普拉斯矩阵  $L$  并标准化;
- (4) 采用归一化切分 (normalized cut, Ncut) 方法进行图划分;
- (5) 用传统聚类方法进行聚类;
- (6) 得到簇划分  $C$ 。

如 1.1 节虚拟分区的划分原则所述,进行虚拟压力分区以节点间的压力相似性为目标,同时顾及节点本身坐标属性,以免应用于实际拓扑复杂的管网时出现同一压力分区节点相距太远的情况。因此,首先利用节点的压力及节点坐标作为样本属性,构造谱聚类算法的样本集。对于每个样本点  $V_i$ , 对其 3 个属性值进行归一化预处理,并采用熵权法赋权表示不同属性对样本点属性的贡献,定义其属性如式(1)。

$$V_i = (\omega x_i, \omega y_i, \gamma \bar{h}_i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

- 其中:  $x_i$  ——归一化处理后样本点横坐标值;  
 $y_i$  ——归一化处理后样本点纵坐标值;  
 $\bar{h}_i$  ——归一化处理后样本点 7 d 时间的压力平均值, m;  
 $\omega$  ——熵权法计算所得的坐标权重;  
 $\gamma$  ——熵权法计算所得的压力权重;  
 $m$  ——节点数量, 个。

经以上运算得到样本集  $V$ , 而后在程序中输入相似矩阵的生成方式, 降维后的维度  $k_1$ , 聚类方法以及聚类后的维度降维后的维度  $k_2$ , 运行程序, 输出值即对应虚拟压力分区结果。

## 2 漏损区域识别方法原理

利用谱聚类方法完成虚拟分区, 同时通过水量平衡计算方法, 对获取的日售水量、产销差数据进行处理得到片区总漏量估计值, 在此基础上将漏损水量分解到每个虚拟分区的各节点上, 利用分配前后

测压点的压力差值获得压力变化残差矩阵, 以区域漏损比例系数为决策变量, 以有限测压点数据与模拟压力差值最小为目标, 使用 SEGA 寻求残差矩阵二范数的最小值, 优化漏损水量的空间分布, 最优解中的各项决策变量对应为各分区漏损水量比例系数。SEGA 寻优流程如图 1 所示。

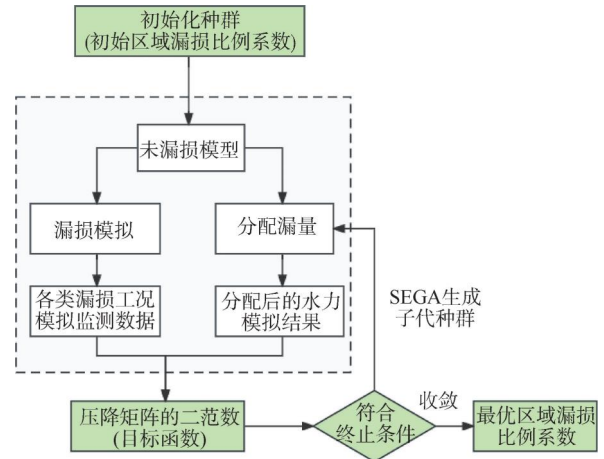


图 1 SEGA 求解区域漏损系数最优值实现过程

Fig. 1 Implementation Process of SEGA Solution for Optimal Values of Regional Leakage Coefficients

### 2.1 漏损水量计算

根据片区产销差数据可对供水管网真实漏损量进行估算。产销差水量包括未收费合法用水量、表观漏损水量以及真实漏损水量。根据相关工程经验, 供水管网漏损水量比产销差水量少 1%~2%, 且真实漏损水量为漏损水量的 60%~70%。因此, 供水管网中的真实漏损水量  $Q_L$  可由式(2)计算。

$$Q_L = (60\% \sim 70\%) \times [Q_s - (1\% \sim 2\%)] \quad (2)$$

其中:  $Q_L$  ——真实漏损水量, L/s;

$Q_s$  ——产销差水量, L/s。

文章假设水力模型中的所有节点均发生漏损, 并利用 EPANET 水力模拟软件中的喷射器模拟节点漏损。节点漏损水量可由式(3)计算得出。

$$Q_i = c h_i^\alpha \quad (3)$$

其中:  $Q_i$  ——第  $i$  个节点漏损水量, L/s;

$c$  ——喷射系数;

$h_i$  ——节点自由水头, m;

$\alpha$  ——喷射系数, 取值为 1.18。

对于式中的喷射系数  $c$ , 计算如式(4)。



$$c = kx \quad (4)$$

其中: $k$ ——节点  $i$  的漏损风险值;

$x$ ——优化漏损水量空间分布的决策变量,表示区域漏损比例系数。

对于式中的节点漏损风险值  $k$ ,可根据该点附近管段的管材和管龄划分区域内不同节点的风险值。采用比例风险回归模型结合算例中供水管网的管材、管龄、管径、漏损维护记录等数据,建立管道风险评估模型,从而获得管道风险系数值。本研究在此基础上将与节点邻接的管道风险系数值折算至节点上,得到各节点风险值  $k$ 。

在研究片区中,供水管网中的  $Q_L$  即为  $Q_i$  之和,如式(5)。

$$Q_L = \sum_{i=1}^m Q_i \quad (5)$$

将分区漏损水量分解到区域内的每个节点上,完成漏损水量的分配。在遗传算法执行的过程中,节点风险值  $k$  不发生变化,仅由区域漏损比例系数  $x$  作为决策变量进行优化计算。

## 2.2 目标函数

以分配漏损水量前后各节点关于测压点的压力差值构成残差矩阵,再以该残差矩阵的二范数为目标函数,使用 SEGA<sup>[11]</sup> 寻求最优解。

在漏量分配过程中,由于节点流量相比未分配漏量时发生了变化,各测压点监测到的压力值也会有所波动。残差向量定义如式(6),表示供水管网中有  $m$  个节点, $n$  个压力监测点,在完成漏量分配后,第  $i$  个节点对于漏损产生的压力变化。

$$r_i = \begin{bmatrix} \hat{p}_1^{Q_i} - \hat{p}_1 \\ \vdots \\ \hat{p}_n^{Q_i} - \hat{p}_n \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

其中: $r_i$ ——节点  $i$  模拟漏损时的压力残差向量;

$\hat{p}_j^{Q_i}$ ——节点  $i$  模拟漏损时,第  $j$  个测压点的压力值, $m$ ;

$\hat{p}_j$ ——实测数据中第  $j$  个测压点的压力值, $m$ 。

将片区总漏量分配至所有的节点后进行水力模拟计算,各节点的对应测压点模拟值与实际值作差,

得到关于管网中  $m$  个节点残差向量组成的残差矩阵。通过计算残差矩阵二范数  $\lambda'$ ,由二范数大小可推得该漏量分配情况下节点的模拟压力值与实际监测压力值的相似程度。若  $\lambda'$  越小则漏量分配的结果越接近真实漏损情况,漏损区域识别的结果更有可靠性。残差矩阵二范数的计算如式(7)。

$$\lambda' = [r_1, \dots, r_m]^H [r_1, \dots, r_m] \quad (7)$$

其中: $[r_1, \dots, r_m]^H$ ——矩阵  $[r_1, \dots, r_m]$  的伴随矩阵。

## 3 上海市奉贤区南桥供水管网漏损区域识别的案例分析

### 3.1 案例管网概况

文章以南桥区域的供水管网作为实际工程案例。南桥区域隶属于上海市奉贤区,是奉贤区的中心城区,目前共有用水户约为 13.08 万户,近 2 年平均日供水量约为 11 万  $m^3$ ,根据南桥区域 2021 年 1 月—2022 年 9 月的产销差数据,其在统计时间内的平均产销差率为 25.62%,高于奉贤区的平均水平。区域 DN100 及以上管径的管道长度总和约为 368.04 km,流量监测设备为 9 个,水力模型区域内压力监测设备为 13 个。研究中南桥原始的水力模型(模型 A)由奉贤区管网水力模型切割而来,以南桥镇一级流量计或模型计算的边界管段流量结果作为输入流量,模型如图 2 所示。由于模型 A 中总漏损量是按比流量方式分配,且与当前漏损评估时段(2022 年 7 月—2022 年 9 月)实际漏损量有差异,故根据该区域 2022 年 7 月—2022 年 9 月的水量数据重新计算区域内日均总漏损水量,并从模型 A 中扣除该部分水量,从而获得待分配漏量的水力模型 B。

### 3.2 虚拟压力分区

利用前述方法对该区域管网进行虚拟压力分区划分,在分区结果中,将区域模型划分了 14 个虚拟压力分区,如图 3 所示。其中 12 号、13 号、14 号分区为泵站独立供水区域,用阀门将其与周围管网隔断。

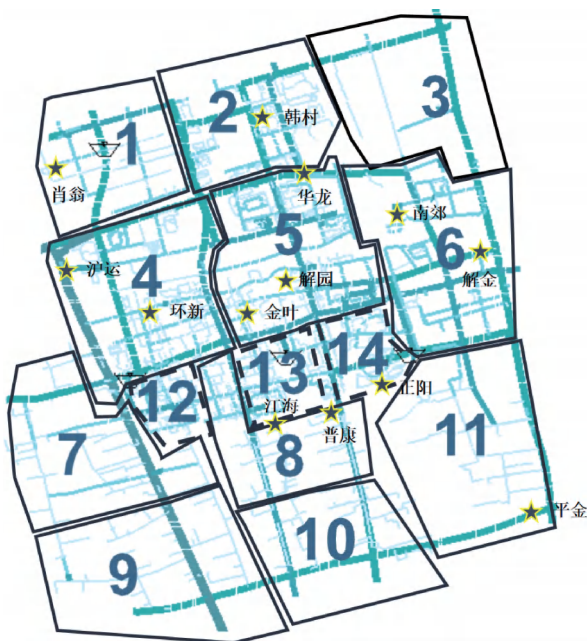
### 3.3 优化算法执行

由自来水公司提供的测压点压力数据整理得到该区域范围内 13 个压力监测点 2022 年 8 月 1 日—2022 年 8 月 7 日的 7 d 平均压力数据,作为优化算法中构造残差矩阵的输入数据,接着采用 SEGA 算



图2 南桥镇供水管网模型

Fig. 2 Water Supply Network Model in Nanqiao Town



注:★为测压点;数字1~14为分区编号。

图3 南桥镇虚拟压力分区

Fig. 3 Virtual Pressure Zones in Nanqiao Town

法进行决策变量的优化运算,以得到各个区域的漏损比例系数。设定最大迭代次数为300,将以上参数输入至算法,进行漏损区域识别计算。遗传算法迭代达到最大次数时,程序返回最优决策值,此时决

策变量即为南桥管网各虚拟压力分区区域漏损系数,将该漏损水量分配结果更新至模型B获得识别区域漏损水量后的模型C。

根据区域识别结果中的各分区计算漏损比例绘制得到漏损区域识别结果,如图4所示。由图4可知,以4号和5号分区为首的南桥中部地区漏损率为1.29%~1.88%,漏损情况比起其他分区更为突出,而北侧和西侧区域的漏损率较低,分区漏损占供水比率大多维持在1%以下。

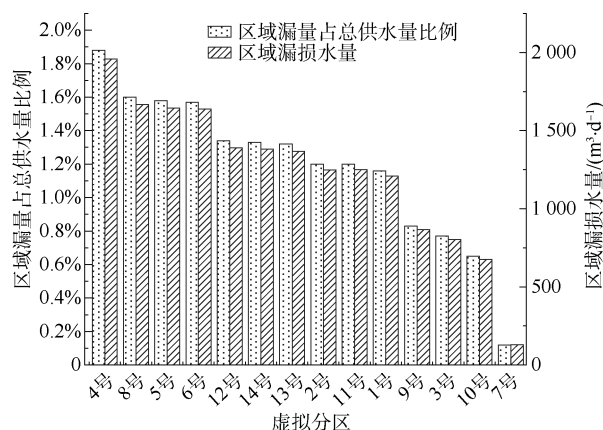


图4 漏损区域风险

Fig. 4 Risk of Leakage Area

### 3.4 漏损区域识别结果与讨论

#### 3.4.1 漏损区域识别结果

南桥2022年7月—2022年9月的平均产销差率为25.66%,将每个分区漏损比例系数乘上总漏损率得到各分区漏损率,结合供水量,最终可得到最优解下各虚拟分区的漏量。将各分区漏量按照前述方法分配至各节点,进而得到完成漏量分配的水力模型,运行水力模型模拟软件获得其在漏损区域识别完成后的测压点压力模拟值,与对应测压点实测压力值作差可得图5。由图5可知,各测压点模拟值与实测值之差基本维持在1.5 m以内,50%测压点差值在1 m以内。

#### 3.4.2 方法对比讨论

将漏损识别过程中的总漏量等比例分配至未分配漏量的水力模型并运行模拟,可得到该方式下的区域漏损结果。此外,针对研究区域西南方向虚拟分区目前不具备压力监测装置且区域识别结果中漏损率较低的情况,采用将上述分区漏量上调的方法进一步验证其若是存在漏损能否被其他分区内测压点识别。在最终漏损区域识别结果中漏损最为严重

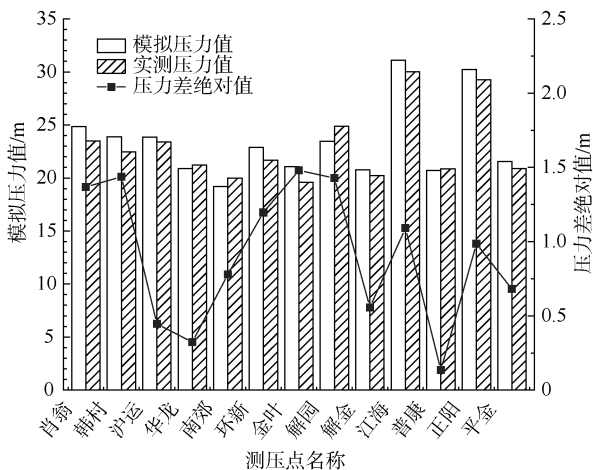


图5 漏损区域识别后模拟压力值与实际压力数据差值

Fig. 5 Difference of Hydraulic Model Simulated Values and Pressure Data by Actual Monitoring after Identification of Leakage Areas

的4号分区,计算漏损率为1.88%,而7号分区漏损情况相对较少,计算漏损率为0.12%。在已完成漏损区域识别的水力模型中,将4号分区与7号分区的漏量对调并分配为区域内各节点漏量,得到对调后的水力模型并运行模拟,得到各测压点的模拟压力值,进一步处理得到与实测值差值。将其与上述2种分配方式的压力差值进行对比,可绘制各测压点在上述3种方案中的压差情况如图6所示。

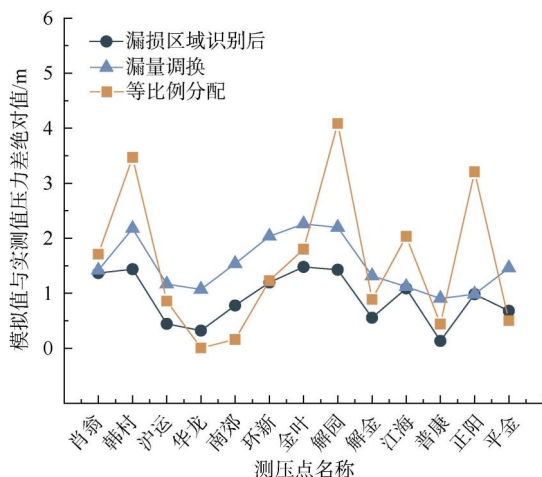


图6 不同漏量分配方式下监测点压力差值情况

Fig. 6 Pressure Differences of Monitoring Points under Different Leakage Distribution Methods

由图6可知,等比例分配漏量至节点所产生的压力差值总体上最大,利用漏损区域识别方法分配漏量的压力差值最小,而在完成漏损区域识别基础

上,仅将其中2个虚拟分区漏量对调所产生的压力差值处于二者之间。在等比例将总漏量分配至各节点的结果中,有4个压力监测点模拟值与实测值的差值为2 m以上。总体上看,漏损区域识别结果所产生的差值更小,数据更稳定,与实际情况更相符。

进一步比较漏损区域识别结果与漏量调换结果,可发现后者的压力差值曲线相对于前者基本呈现上移趋势,大多测压点增加了0.75 m左右的压力差值,其中最大变化达到0.84 m。该结果一方面可说明,若7号分区存在漏损情况,管网模型内的测压点能对此有所反映,具体体现为压力值的明显变化。另一方面,各测压点对于改变区域漏损情况可产生压力变化、压力变化的幅度不同,也进一步说明区域漏损空间位置不同,测压点的差异特征也会不同。

综合上述结果与讨论,漏损区域识别方法在大型供水管网中亦具有良好的应用效果,识别结果中的测压点模拟压力值与实测值更为接近,能够将研究地区漏损严重区域识别出来,为区域检漏工作的开展优先顺序提供参考依据。

### 3.4.3 实际数据验证

为进一步说明漏损区域识别方法在研究区域的应用效果,对研究区域2021年1月—2022年8月共计20个月实际漏损点工单进行整理,将识别结果与实际漏损工单汇总如表1所示。由实际漏损点工单可知,4号、5号、12号、13号、14号分区的漏损频次占比明显比其他分区高,漏损区域识别技术基本能将漏损严重区域识别。进一步分析发现,部分分区计算漏损比例相近而实际漏损频次比例存在差异的问题,推测可能有以下2方面原因:一方面,水司提供的工单仅有对某一时间的某点发生漏损的记录,未对漏损水量进行更多的记录整理。因此,对不同分区漏损频次的统计分析仅能粗略代表统计时间内该区域漏损次数占比。而在漏损区域识别结果中,计算漏损比例更侧重于对漏损水量的描述。另一方面,可能在实际的检修与记录工作存在缺检或漏记。因此,存在部分分区计算漏损比例与实际数据有所差异的情况。

## 4 结论

(1)针对供水管网中实际压力监测设备的数量要远小于水力模型节点数量的问题,采用基于谱聚



表 1 漏损区域识别分区漏损量

Tab. 1 Leakage Volume of DMA Identification in Leakage Area

| 项目   |      | 计算<br>漏损比例 | 计算<br>漏损率 | 计算漏损量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 实际漏损<br>频次占比 |
|------|------|------------|-----------|------------------------------------------------|--------------|
| 虚拟分区 | 1 号  | 7.02%      | 1.16%     | 1 209.80                                       | 0.56%        |
|      | 2 号  | 7.25%      | 1.20%     | 1 249.44                                       | 5.88%        |
|      | 3 号  | 4.66%      | 0.77%     | 803.09                                         | 0            |
|      | 4 号  | 11.36%     | 1.88%     | 1 956.12                                       | 14.01%       |
|      | 5 号  | 9.54%      | 1.58%     | 1 644.09                                       | 25.77%       |
|      | 6 号  | 9.51%      | 1.57%     | 1 638.92                                       | 3.08%        |
|      | 7 号  | 0.75%      | 0.12%     | 129.25                                         | 0.28%        |
|      | 8 号  | 9.67%      | 1.60%     | 1 666.49                                       | 5.04%        |
|      | 9 号  | 5.03%      | 0.83%     | 866.85                                         | 0.28%        |
|      | 10 号 | 3.92%      | 0.65%     | 675.56                                         | 0            |
|      | 11 号 | 7.26%      | 1.20%     | 1 251.17                                       | 0            |
|      | 12 号 | 8.07%      | 1.34%     | 1 390.76                                       | 8.96%        |
|      | 13 号 | 7.94%      | 1.31%     | 1 368.35                                       | 22.97%       |
|      | 14 号 | 8.02%      | 1.33%     | 1 382.14                                       | 13.17%       |
| 总计   | -    | 100.00%    | 16.54%    | 17 232.03                                      | 100.00%      |

类算法的虚拟压力分区方法起到了降维作用,使漏损区域识别更为可行,且取得了较好的效果。

(2)在漏损区域识别中,采用 SEGA 能够很好地将优异个体保留、迭代种群并收敛,达到指定最高迭代次数后找到虚拟分区的最优区域比例系数。

(3)通过实际工程案例的应用,成功识别出了漏损严重的区域,结合实际漏损工单统计,漏损区域识别结果与实际漏损工单中的情况大致相符,说明,该技术可以用于初步确定漏损严重片区,为今后控漏工作开展的优先顺序提供了理论参考,具有实际应用价值。

## 参考文献

- [ 1 ] 佚名. 水污染防治行动计划[J]. 中国环保产业, 2015(5): 4-12.  
Unknown. Water pollution control action plan [ J ]. China Environmental Protection Industry, 2015(5): 4-12.
- [ 2 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban-rural construction statistical yearbook 2021 [ M ]. Beijing: China Statistics Press, 2022.

- [ 3 ] LI R, HUANG H D, XIN K L, et al. A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems [ J ]. Water Supply, 2015, 15(3): 429-441.
- [ 4 ] 董文瑾, 梁俊卿, 孔潇潇. 一种基于双向 LSTM 的供水管网漏损定位方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 105-108.  
DONG W J, LIANG J Q, KONG X X. Bidirectional LSTM method for leakage location of water supply pipe network [ J ]. Water Resources and Power, 2021, 39(4): 105-108.
- [ 5 ] STEFFELBAUER D B, GÜNTHER M, FUCHS-HANUSCH D. Leakage localization with differential evolution: A closer look on distance metrics [ J ]. Procedia Engineering, 2017, 186: 444-451. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.251.
- [ 6 ] RIBEIRO L, SOUSA J, MARQUES A S, et al. Locating leaks with trustank algorithm support [ J ]. Water, 2015, 7(4): 1378-1401.
- [ 7 ] 林森. 服务于供水管网模型校核的异步监测网络构建技术研究 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2022.  
LIN B. Research on constructing of asynchronous sensor system in water distribution networks for hydraulic model calibration [ D ]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [ 8 ] 杨之江, 周煜岷, 扈震, 等. 耦合模块度优化与谱聚类的供水管网分区算法 [ J ]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 1614-1620.  
YANG Z J, ZHOU Y M, HU Z, et al. Coupling modularity optimization and spectral clustering of water supply network partition algorithm [ J ]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2021, 49(11): 1614-1620.
- [ 9 ] 刘宁. 基于谱聚类算法的供水管网智能 DMA 分区优化研究 [ D ]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.  
LIU N. Research on intelligent DMA zoning optimization of water supply network based on spectral clustering algorithm [ D ]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [ 10 ] NARDO A D, NATALE M D, GIUDICIANNI C, et al. Water supply network partitioning based on weighted spectral clustering [ M ]. Cham: Springer International Publishing AG, 2017.
- [ 11 ] ZHU P C, SHENG Z, BAO J L, et al. Antenna selection for full-duplex distributed massive MIMO via the elite preservation genetic algorithm [ J ]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(4): 922-926.